УДК 622.02:531

СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ И КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов

Томский политехнический университет
E-mail: besko48@tpu.ru

Показано влияние проводимости горных пород на амплитуду электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении. Приведены экспериментальные результаты, указывающие на связь электромагнитной эмиссии и токов поляризации с этапами нагружения эпидот-гранатовых скарнов и магнетитовой руды при квазистатическом воздействии.

В процессе механического нагружения горных пород происходит их деформирование и разрушение, сопровождающееся образованием и развитием трещин различного масштаба от микротрещин до магистрального разрыва. При этом возникает акустическая (АЭ) и электромагнитная (ЭМЭ) эмиссии. Известно, что АЭ развивается с нарастанием интенсивности и достигает своего максимального значения во время макро разрушения. В работах [1–3] показано, что существует определенная связь между параметрами ЭМЭ и АЭ в диэлектрических материалах, обусловленная характером механоэлектрических преобразований в них. В свою очередь, разрыв ионных связей при образовании трещин приводит к появлению флуктуационного заряда на гранях трещин, неравномерное движение которых тоже ответственно за ЭМЭ.

При деформировании горных пород задолго до начала трещинообразования происходит движение имеющихся и вновь образованных дислокаций, которые вместе с заряженными точечными дефектами, окружающими их, участвуют в образовании двойных электрических слоев, являющихся важным звеном в механоэлектрических преобразованиях при воздействии акустических волн. При одноосном сжатии эти перемещения дефектов создают токи, которые имеют направленность из зон нагружения в зоны разгрузки и могут быть зарегистрированы соответствующей аппаратурой.

Известно, что при прохождении через кристалл упругой волны с частотой ν_a, фиксируется электромагнитный сигнал (ЭМС), в спектре которого преобладает такая же частота ν_a. Соотношение энергий электромагнитного и акустического излучений описывается выражением $m_0=\delta_0^2/\sigma_{кр}\varepsilon$, где δ_0 – поверхностная плотность электрических зарядов; $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение развития трещин, которое зависит от модуля упругости, поверхностной энергии развития трещин, стартовых размеров трещины и величины скачка трещины, а также от коэффициента Пуассона; ε – диэлектрическая проницаемость [4]. Это соотношение характеризует распределение электроупругих полей при образовании трещин нормального отрыва. В работе [5] указывается, что при одноосном сжатии образцов известняка и искусственного материала, моделирую-

щих неоднородную среду, происходит образование различных типов акустических волн, которые можно связать с процессом трещинообразования. Причем показано, что ЭМЭ возникает уже на первых стадиях нагружения, составляющих единицы и первые десятки процентов от разрушающих напряжений, и сопровождает весь процесс трещинообразования. Акустические волны от растущих трещин приводят в действие механизм, при котором происходят колебания величины дипольного момента двойных электрических слоев в статически нагружаемом объекте вследствие изменения расстояния между зарядами разного знака. В результате этого происходит эмиссия электромагнитных сигналов. В акустически возбуждаемых горных породах в лабораторных и натурных условиях ЭМЭ наблюдается на границах контактирующих минеральных зерен, включений, прожилков и других неоднородностей.

Нашими исследованиями [3, 6] установлено, что в процессе акустического воздействия на горные породы регистрируются ЭМС, параметры которых зависят от структурно-текстурных особенностей и влажности. При этом важной характеристикой при исследовании механоэлектрических преобразований в горных породах являются их электрические свойства, которые зависят от минерального и фазового состава. Поэтому были проведены исследования связи амплитуды электромагнитного сигнала с указанными свойствами при акустическом воздействии и одноосном сжатии горных пород.

Для исследования амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении горных пород с различным удельным сопротивлением использовали установку, приведенную в работе [2]. Возбуждение АС осуществлялось двумя способами. Это генерация АС с помощью акустического пьезоизлучателя посредством подачи на него с генератора электрического импульса длительностью $10^{-6}...10^{-4}$ с и амплитудой 100...800 В ступенчато с интервалом 100 В.

Другим способом возбуждения АС являлся удар шариком с известной массой, который производили с помощью пружинного устройства. Энергия АС оценивалась по скорости пролета шарика по трубке при ударе и отскоке.

Эксперименты по исследованию параметров ЭМС и ЭМЭ при квазистатическом нагружении проводились на прессе ИП-500. Поскольку образцы породы индивидуальны, то в процессе исследования необходимо получать максимум информации по изучаемому явлению. В связи с этим была собрана экспериментальная установка по исследованию параметров электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород, которая состояла из нескольких основных узлов (рис. 1). Нагружение *P* образцов осуществлялось прессом с подвижной и опорной плитами и встроенной силоизмерительной системой СИ. Максимальная нагрузка – 500 кН, которая достаточна для разрушения практически любых образцов пород сечением менее 20 см^2.

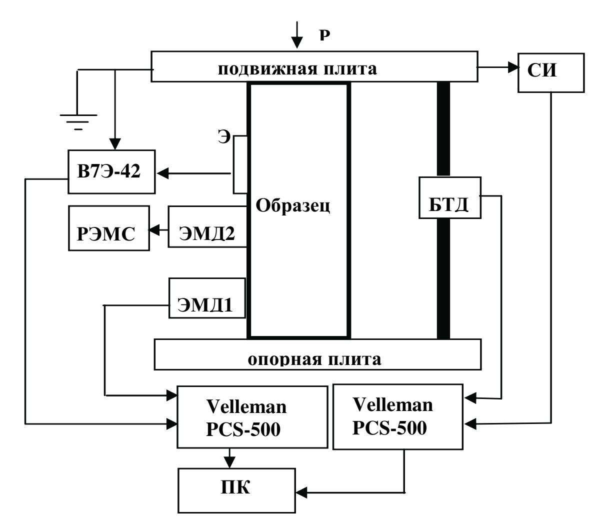


Рис. 1. *Блок-схема установки для одноосного нагружения образцов*

Аналоговый сигнал нагрузки с силоизмерительной системы через осциллографическую приставку PCS-500 Velleman, работающей в режиме самописца, записывался в память компьютера (ПК). С помощью собранных по мостовой схеме тензорезисторов через усилитель блока тензорезисторных датчиков БТД и осциллографическую приставку на ПК регистрировали изменения величины продольной деформации образца. Электромагнитный сигнал измеряли с помощью емкостного датчика ЭМД1, который имел дифференциальный вход и был снабжен согласующим усилителем мощности с коэффициентом усиления 100. В последующем ЭМС через вторую осциллографическую приставку PCS-500 Velleman, также работавшей в режиме самопишущего прибора, передавался на ПК для дальнейшего анализа его характеристик. Измерение тока поляризации i_p осуществляли с помощью вольтметра-электрометра В7Э-42 с последующей записью его в память ПК. Токосъемный электрод Э прикрепляли к образцу проводящим клеем на основе серебра. Информацию об изменениях ЭМЭ при одноосном сжатии образцов, поступающую с датчика ЭМД2, записывали в память прибора РЭМС1 [7], с которого после окончания эксперимента она считывалась на ПК и анализировалась. При необходимости имелась возможность осуществлять акустическое возбуждение нагружаемых образцов перечисленными выше способами.

Эксперименты проводились на образцах горных пород, отобранных на месторождении Таштагольском в Кемеровской области. Исследовались скарны (эпидотовые, гранат-магнетитовые, эпидот-гранатовые); сиениты; микросиениты; диоритовый порфирит; метаморфический сланец и магнетитовая руда.

Исследуемые образцы горных пород обладают различной электропроводностью, обусловленной природой проводимости породообразующих и акцессорных или рудных минералов, а также струк-

турными особенностями, пористостью и влажностью. Так магнетитовая руда, имеет высокую проводимость, ее удельное сопротивление порядка 10^3 Ом·м и менее. Однако эффективность механоэлектрических преобразований в магнетитовой руде будет определяться не только электрическими свойствами основного минерала – магнетита, но и содержанием других минеральных включений, а также структурными особенностями. Так, например, столбец 10 (рис. 2) соответствует амплитуде ЭМС для образца магнетитовой руды с 10 % содержанием кварца. На рис. 2 приведены итоговые значения максимальной амплитуды аналогового ЭМС при акустическом возбуждении образцов Таштагольского месторождения. Исследуемые образцы в зависимости от типа породы распределены в три группы.

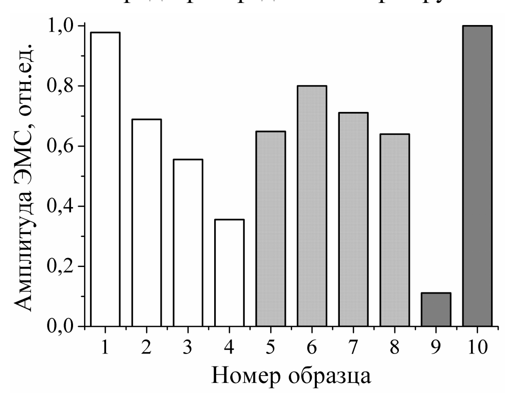
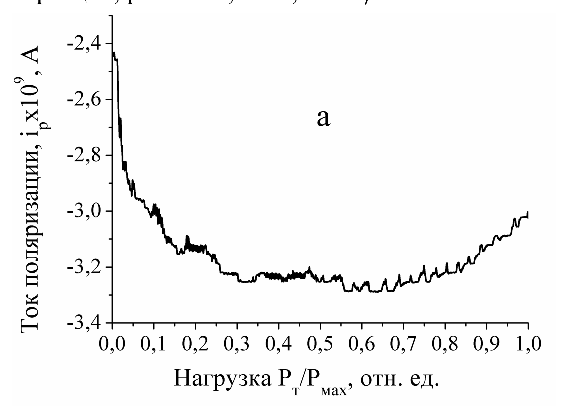


Рис. 2. *Максимальная амплитуда электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении горных пород Таштагольского месторождения: 1) скарн эпидотовый; 2) скарн эпидот-гранатовый; 3) скарн с включения пирита и магнетита; 4) скарн гранат-магнетитовый; 5) сиенит; 6) микросиенит; 7) метаморфический сланец; 8) диоритовый порфирит; 9) магнетитовая руда; 10) магнетитовая руда с трещиной, залеченной кварцем*

В первую группу вошли скарны различного состава с удельным сопротивлением до 10^7 Ом·м. Амплитуда электромагнитного сигнала от образцов, имеющих в своем составе высокопроводящие минералы, такие как пирит и магнетит, существенно меньше (столбец 3 и 4) по сравнению с образцами, в составе которых нет минералов с большой проводимостью. Во вторую группу вошли образцы пород со средним удельным сопротивлением до $10^6...10^7$ Ом·м, не имеющих в своем составе высокопроводящих минералов. Амплитуды их электромагнитных откликов сравнимы со скарнами без включений пирита и магнетита. В этой группе максимальная амплитуда ЭМС слабо отличается от образца к образцу. В отдельную группу выделена магнетитовая руда, в которой в отсутствии кварцевых включений амплитуда электромагнитного отклика небольшая. Известно, что магнетит является одним из самых проводящих минералов. Поэтому возможным объяснением наблюдаемому эффекту является потеря энергии ЭМС в проводящей среде. Так для магнетита коэффициент поглощения ЭМС можно записать как $\alpha\approx\sqrt{\pi\mu f/\rho}$, где μ – магнитная проницаемость; ρ – удельное сопротивление; f – частота. На частоте 1 кГц для магнетита $\rho=10^3$ Ом·м, $\mu=10^4$, а коэффициент поглощения соответствует $\alpha=170$ м$^{-1}$. На частоте $f=10$ кГц коэффициент поглощения $\alpha=560$ м$^{-1}$. Изменение амплитуды гармоники частотой 1 кГц на расстоянии 1 см определялась как $E/E_0=e^{-\alpha x}=0,37$, где E – напряженность электрического поля, E_0 – сигнал на входе. Для частоты 10 кГц это отношение равно $3,7\cdot10^{-3}$. В результате амплитуда частотных гармоник ЭМС более 10 кГц уменьшится в 100 раз сильнее, чем амплитуда частотных гармоник ЭМС менее 1 кГц.

При одноосном сжатии эксперименты проводились на образцах горных пород, отобранных на Таштагольском месторождении и представленных магнетитовой рудой и вмещающими породами, которые отличались проводимостью. Образцы отбирались из кернов и имели цилиндрическую форму высотой 8,0 см и диаметром 4,0 см. Нагружение производили вдоль наибольшей оси образцов линейно до разрушающих значений. Скорость изменений усилий прессом поддерживалась для всех образцов, равной 0,32±0,03 кН/с.



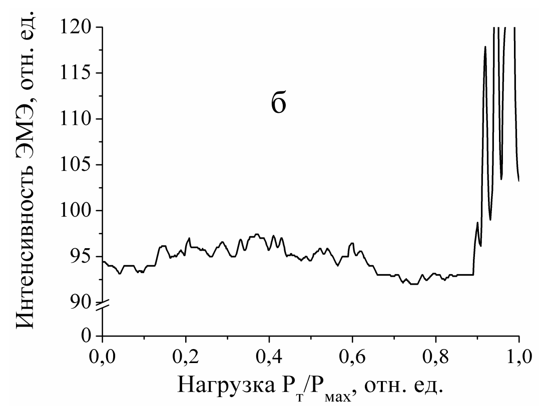


Рис. 3. *Изменения: а) тока поляризации i_p и б) электромагнитной эмиссии при нагружении до разрушающих значений $P_{мах}$ образца эпидот-гранатового скарна*

Регистрировались изменения нагрузки $P_т$, продольная деформация, электромагнитная эмиссия и изменение тока поляризации i_p. Изменения ЭМЭ и i_p для образца эпидот-гранатового скарна на всем этапе нагружения до разрушающих значений представлено на рис. 3. Для этого образца разрушающее усилие $P_{мах}$ составило 202 кН. Зависимости ЭМЭ и i_p для

образцов магнетитовой руды представлены на рис. 4. На рис. 4, *а*, *б*, показаны зависимости ЭМЭ и i_p при нагружении образцов магнетитовой руды с диагональной трещиной толщиной 2...4 мм, залеченной эпидотом, и несколькими трещинами, залеченными кальцитом, толщиной менее 1 мм. На рис. 4, *в*, *г*, эти же зависимости для магнетитовой руды с обособленными вкраплениями и трещиной толщиной до 2 мм, залеченной кальцитом. Для этих образцов $P_{мах}$ составила 224 и 212 кН, соответственно, причем первый образец разрушился по диагонали, а второй – по классическому механизму с множественными трещинами отрыва и с образованием пирамидок у нагружающих плит пресса. Исходя из того, что образцы вмещающих пород и магнетитовой руды отличались по своим электрическим и магнитным характеристикам, приемным устройством ЭМЭ для магнетитовой руды служили индукционные датчики, а для вмещающих пород – емкостные.

Как и следовало ожидать, в процессе нагружения образцов, с момента приложения нагрузки, регистрируется электромагнитная эмиссия. Характер изменения ЭМЭ показывает увеличение электромагнитной активности на этапе, предшествующем разрушению образцов (рис. 3, *б*, 4, *а*). На этих участках нагружения происходит нестационарный процесс трещинообразования и, как следствие, наблюдается повышенная акустическая эмиссия, которая при взаимодействии с двойными электрическими слоями в исследуемых образцах вызывает вариации ЭМЭ.

Обращает на себя внимание ход изменения тока поляризации в процессе деформирования образцов вмещающих пород и магнетитовой руды. Так для эпидот-гранатового скарна с момента начала сжатия образца ток непрерывно нарастал до значений i_p=–3,2·10⁻⁹ А, затем в интервале 0,3...0,7 от предельной нагрузки ток остается примерно на одном уровне и только с приближением к $P_{мах}$ величина тока падает. Такой вид зависимостей с некоторыми вариациями по абсолютной величине тока характерен для многих вмещающих пород. Этому соответствуют и изменения интенсивности ЭМЭ. В интервале 0,2...0,7 от $P_{мах}$ наблюдали повышенные значения ЭМЭ, после чего до образования трещин отрыва изменения ЭМЭ выражены слабо.

Для разрушившегося по диагонали образца магнетитовой руды значение тока изменялось по абсолютному значению в интервале $(10...4)\cdot10^{-7}$ А (рис. 4, *б*), а для образца, разрушившегося классическим способом, значение тока изменялось в интервале $(2,0...1,4)\cdot10^{-5}$ А (рис. 4, *г*). В обоих образцах на протяжении всего цикла нагружения знак тока скачкообразно менялся от минуса к плюсу и обратно. При переполяризации абсолютное значение тока оставалось неизменным. Причем если при диагональном разрушении образца магнетитовой ру-

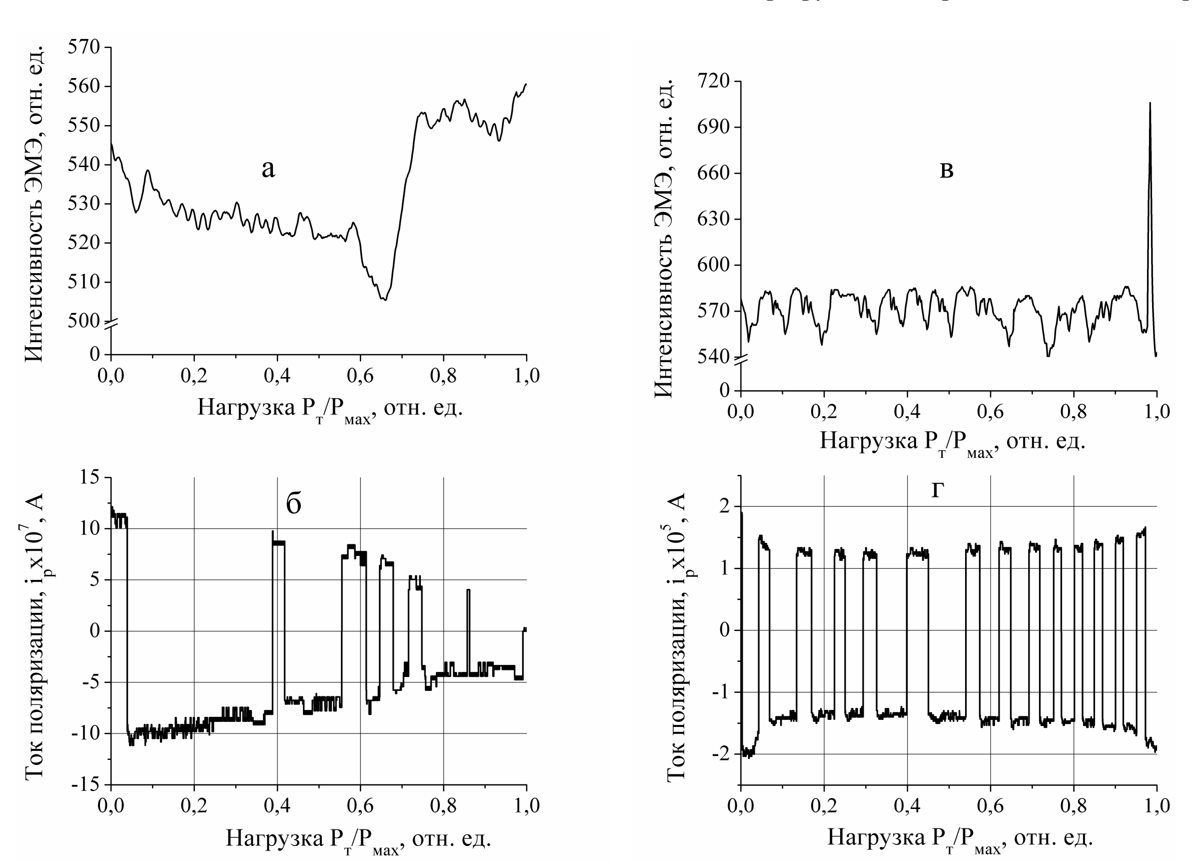


Рис. 4. *Изменения электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) и тока поляризации i_p при нагружении до разрушающих значений $P_{мах}$ образцов магнетитовой руды: а, б – для образца с диагональной трещиной, залеченной эпидотом и кальцитом; в, г – для образца с обособленными вкраплениями кальцита*

ды, несмотря на переполяризацию, ток уменьшался, то при классическом способе разрушения ток слабо изменялся и к моменту разрушения возрастал практически до первоначального значения. Наибольшее количество переполяризаций тока для образца магнетитовой руды с диагональной трещиной наблюдалось при значениях нагрузки 0,55...0,75 от $P_{мах}$, когда развивалась зона разрушения. Этому же интервалу соответствовало и максимальное изменение ЭМЭ (рис. 4, *а*). Для второго образца магнетитовой руды переполяризация тока наблюдалась с разной периодичностью на всех этапах нагружения до его разрушения. Причем наибольшая периодичность изменения полярности i_p происходила на этапе уплотнения образца до значений 0,3 от $P_{мах}$ и в интервале 0,55...1,0 от $P_{мах}$. Соответственно для этого образца, во всем интервале нагружения интенсивность ЭМЭ носит колебательный характер, и нет значительных изменений ее величины (рис. 4, *в*), кроме как при самом акте разрушения.

Проведенные исследования показали, что разрушающая нагрузка для образцов вмещающей породы и магнетитовой руды примерно одинаковая. Оценивая механические свойства образцов, можно сказать, что этап предразрушения для образцов обоих групп прослеживается по изменениям электромагнитной эмиссии. Особый интерес представляет ход изменения тока поляризации в этих образцах.

Во вмещающих породах при одноосном сжатии возникал ток поляризации, который на начальном этапе нагружения при уплотнении образца за счет имеющихся в нем трещин и пор, обусловлен смещением центров тяжести разноименных зарядов, в результате чего возникают электрические диполи. Образование и релаксация их сопряжены с перемещением заряженных частиц, т.е. с появлением тока. Движение дислокаций также приводит к появлению тока. Дальнейшее равномерное увеличение нагрузки ($P_т/P_{мах}$=0,5...0,7) приводило к стабилизации процессов увеличения i_p, которая обусловлена перемещением вновь образованных дислокаций и заряженных частиц, и уменьшением этого тока в результате появления новых микротрещин и их роста, препятствующих движению дислокаций и заряженных дефектов структуры. На этапе укрупнения очагов разрушения и образование магистрального разрыва ($P_т/P_{мах}\geq$0,7) значение тока уменьшалось, так как на этом этапе превалирует процесс роста трещин. Интервал 0,5...0,7 от $P_т/P_{мах}$ выделяется тем, что направленно двигающиеся под действием приложенных статических напряжений дислокации и заряженные дефекты замыкаются на вновь образованных микротрещинах, контактах зерен и фрагментах включений разных минералов. Образуются или подзаряжаются уже имеющиеся двойные электрические слои. В результате колебания любым способом этих слоев интенсивность ЭМЭ и амплитуда ЭМС будут возрастать, что мы и наблюдаем в эксперименте. Укрупнение очагов разрушения и образование трещин отрыва приводит к увеличению площади двойных электрических слоев и выделившейся акустической энергии, что сопровождается возрастанием интенсивности ЭМЭ и амплитуды ЭМС.

На рис. 4 видно, что для образцов горных пород, представленных магнетитовой рудой, характер изменения регистрируемого тока i_p кардинально отличался от тока при квазистатическом нагружении образцов вмещающих пород. Это, вероятно, обусловлено электрической поляризацией минералов, являющихся включениями в магнетитовую руду, а также спонтанным изменением намагниченности магнетита под действием механических напряжений, в том числе при резком их перераспределении в процессе прорастании трещин [8, 9]. В изменяющемся поле напряжений между разнонаправленными в породе доменами минерала создаются конечные граничные условия, при которых направления магнитных моментов непрерывно меняются. Направления магнитных моментов в граничном слое строго не параллельны и значительно отклоняются от осей легкого намагничивания, что приводит к росту обменной и кристаллографической энергии, которая, вероятно, и обуславливает, наряду с перемагничиванием доменов, изменение направления тока. При этом важно отметить, что процессы переполяризации тока совпадают с изменением интенсивности ЭМЭ на этапе подготовки разрушения (0,55...0,75) от $P_{мах}$ для образца магнетитовой руды, разрушившейся по диагонали (рис. 4, *а*). Для образца магнетитовой руды, разрушившегося классически, такая связь наблюдается на всех этапах нагружения. Для детального выяснения взаимосвязи переполяризации тока и намагниченности магнетитовой руды и влияния их на изменения параметров ЭМЭ требуются дополнительные исследования.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при импульсном акустическом возбуждении амплитудные параметры ЭМС существенно зависят от проводимости горной породы. Наличие в горной породе высокопроводящих минеральных включений приводит к значительному снижению эффективности механоэлектрических преобразований.

Показано, что интенсивность ЭМЭ и токи поляризации при статическом нагружении горных пород коррелируют с этапами уплотнения, подготовки разрушения и самим актом разрушения образцов вмещающих пород и магнетитовой руды. Необходимо отметить, что процесс переполяризации измеряемых токов, вероятно, связан с перемагничиванием доменов магнетита в руде. В случае, когда переполяризация тока наблюдается на всех этапах статического нагружения магнетитовой руды, по характеристикам ЭМЭ затруднительно выделять этапы нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хатиашвили Н.Г. Электромагнитное излучение ионных кристаллов, стимулированное акустической волной // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – Вып. 18.– С. 1128–1132.
2. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И. Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 2. – С. 8–14.
3. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В. Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 5. – С. 95–99.
4. Болотин Ю.И. О коэффициенте электроакустического излучения трещин нормального отрыва при разрушении горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1993. – № 5. – С. 44–46.
5. Шамина О.Г. Об особенностях спектров продольных и поперечных волн // Физика Земли. – 2000. – № 11. – С. 35–39.
6. Яворович Л.В., Гольд Р.М., Ласуков В.В. Исследование амплитуды электромагнитного сигнала при ударном воздействии на образцы горных пород с различной пористостью // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 6. – С. 33–39.
7. Беспалько А.А., Хорсов Н.Н. Аппаратурный комплекс для исследования напряженно-деформированного состояния горных пород в шахтах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Междунар. конф. – Новосибирск, 2004. – С. 210–213.
8. Грабовский М.А. Изменение электрического сопротивления магнетита при намагничивании // Известия АН СССР. Сер. геофизическая. – 1951. – № 4. – С. 61–70.
9. Грабовский М.А., Пархоменко Э.И. Об изменении магнитных свойств магнетитов под действием больших сжимающих напряжений // Известия АН СССР. Сер. геофизическая. – 1953. – № 5. – С. 405–417.

УДК 539.21:539.1